

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIO DE TALCO DO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL PARA DESENVOLVIMENTO DE ROTA DE BENEFICIAMENTO

Táts Regina Cordeiro de Oliveira
Orientadora: Meise Pricila de Paiva

RESUMO

O minério de talco apresenta múltiplas aplicações na indústria moderna de cerâmica, tintas, borracha, fertilizantes, cosméticos, e com a possibilidade de fornecimento de diferentes produtos e o incremento da produção beneficiada, permite que parte desta seja comercializada com maior valor agregado. Neste contexto, este trabalho visa a caracterização tecnológica e realização de estudos preliminares de concentração de um minério de talco, com depósito localizado em Caçapava do Sul-RS, para definição da rota de beneficiamento com adequação do produto ao mercado consumidor. A caracterização tecnológica foi constituída das seguintes etapas: amostragem de canal realizada em bancada; preparação do material amostrado através do processo de cominuição, seguida de homogeneização e quarteamento; análises granulométrica, mineralógica, química, alvura, densidade e umidade do material amostrado. Após a caracterização, foram realizados estudos de separação magnética em tubo Davis e de lixiviação, com intuito de diminuir impurezas, principalmente no que diz respeito à contaminação do depósito por óxidos de ferro e assim possibilitar a definição da melhor rota a ser adotada. Após preparo da amostra, foi possível obter um material fino (~ 65 %) abaixo de 37 μm e a distribuição dos teores dos elementos analisados Fe, Ca, Mg e Al apresentaram comportamento distintos enquanto a alvura mostrou semelhança entre os valores obtidos. Foi possível identificar 5 principais fases presentes no minério de talco (antigorita, clinocloro, magnesita, dolomita e esteatita), incluindo minerais de minério e de ganga. O melhor resultado do estudo foi obtido utilizando a amostra com corte granulométrico (100 #) que foi submetida a separação magnética (4050 Gauss) e posterior lixiviação a 80 °C durante o tempo de 60 minutos. Com isso, foi obtida uma alvura máxima de 72,3 %, com um delta de 10,3 % em relação a alvura inicial. Este produto poderia ser aplicado, por exemplo, à indústria de tintas, inseticida, têxtil e papel, sendo necessária caracterização complementar para enquadramento às demais especificações.

Palavras-chave: talco, caracterização tecnológica, impurezas de ferro, beneficiamento.

1. INTRODUÇÃO

O talco, mineral de destinação nobre para cosméticos, tintas, papel, pode também possuir destinação simples para cerâmica, borracha, inseticidas e fertilizantes. Este mineral, ocorre em granulometria bastante fina, em rochas de textura pulverulenta e está associado a impurezas como titânio, serpentina, dolomita, magnesita, calcário, manganês e óxidos de ferro, ora na forma de minerais de ganga, ora na rede cristalina. Estas impurezas determinam a variabilidade de ocorrência de minérios quanto à alvura, granulometria, textura, composição química e hidrofobicidade (Pontes & Almeida, 2005).

No Brasil, onde a maior parte da produção de talco destina-se ao uso cerâmico, as reservas são da ordem de 117 milhões de toneladas, colocando o país entre os principais produtores mundiais. O estado do Paraná assume posição de destaque com 41 % da produção total, enquanto o estado do Rio Grande do Sul apresenta apenas 6 % (Pontes & Almeida, 2005), com destaque para o município de Caçapava do Sul com uma reserva medida de

4.546.150 toneladas, indicada de 605.442 toneladas, e lavrável de 4.543.558 toneladas (Anuário Mineral Brasileiro, 2010).

Segundo dados divulgados no Sumário Mineral do ano de 2015, pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a produção de talco beneficiada no ano de 2014 teve um acréscimo de 36,9 %. Se comparada ao ano anterior, este acréscimo foi de 28,3 %, enquanto as importações cresceram 8,6 %, menos do que no ano anterior. Ainda, segundo os dados do DNPM, o valor importado diminuiu 2,1 %, enquanto o consumo interno aparente cresceu em torno de 32,2 % se comparado ao ano anterior. Este acréscimo incentiva a busca pela melhoria dos processos de lavra e beneficiamento dos depósitos de talco, visando torná-los passíveis de operação, como é o caso do depósito foco deste estudo.

De acordo com Pontes & Almeida (2005), no Brasil, a lavra seletiva e a manual são os principais métodos adotados para melhorar a qualidade do minério de talco, enquanto o beneficiamento é realizado apenas com uma etapa de secagem seguida da moagem para reduzir a granulometria exigida pelo mercado consumidor. Tal fato evidencia a carência em tecnologia e informação transferida ao minério proveniente destes processos rudimentares.

Neste sentido, este estudo tem o intuito de minimizar a carência de informação sobre o depósito em questão, através da caracterização tecnológica do minério. Esta caracterização, definida como etapa fundamental para otimizar o aproveitamento de um recurso mineral, permite identificar com precisão, ineficiências e perdas em processos, tornando possível o aumento do rendimento global e o correto dimensionamento da rota de beneficiamento (Neumann *et al.*, 2004), exigirá além da amostragem e preparação das amostras, a aplicação de métodos físicos, químicos e físico-químicos objetivando a purificação do minério de talco de maneira a adequá-lo às especificações de comercialização, o que aumenta a produção e a qualidade do produto ao utilizar técnicas variadas como: lixiviação e separação magnética.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Talco

Pontes & Almeida (2005) descreve o talco como filossilicato de magnésio hidratado de fórmula química $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$, com arranjo espacial “t-o-t” representado por duas folhas tetraédricas -t- ligadas entre si por ligações de Van Der Waals e formadas por átomos de silício e oxigênio (folha siloxana) que envolvem uma folha octaédrica -o- formada por magnésio e hidroxila (folha de brucita), apresentando algumas características relacionadas ao tipo de ligação do arranjo deste mineral:

- i. ligações de Van Der Waals se quebram mais facilmente conferindo às suas partículas uma superfície altamente hidrofóbica, facilitando o processo de flotação;
- ii. clivagem basal perfeita oriunda da zona de fraqueza ao longo do plano cristalográfico;
- iii. poder lubrificante e adsorvente a óleos e gorduras.

Segundo Camara (2003), pode ocorrer em duas simetrias diferentes, monoclinica (mais comum) e triclinica, enquanto a estrutura cristalina (Figura 1) apresenta uma camada tripla, sendo uma folha de hidróxido de magnésio e duas folhas compostas por tetraedros de

SiO_4^{4-} . As faces silicosas externas são apolares e oleofílicas, hidrofóbicas, aerofílicas e inertes.

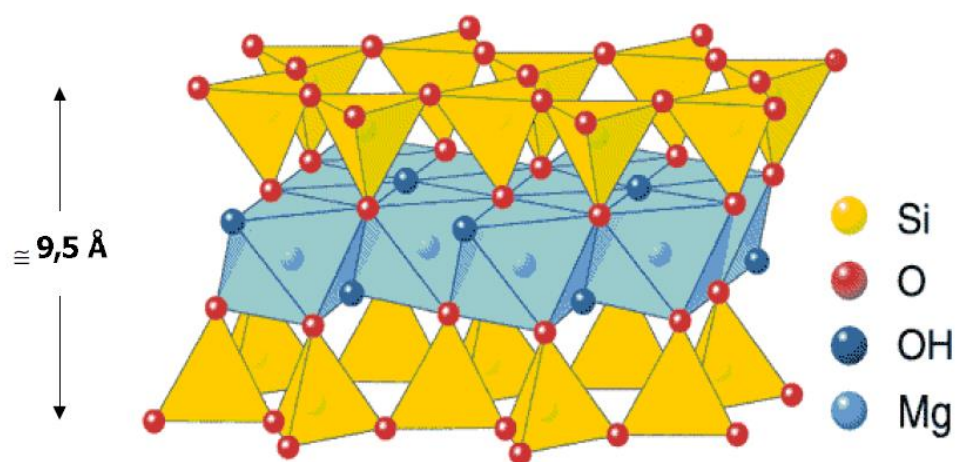


Figura 1 - Estrutura cristalina do minério de talco (Fonte: Camara,2003).

Ainda em seu estudo sobre talco, Camara (2003) afirma que este mineral apresenta a coloração do traço branca, porém pode apresentar em forma bruta as colorações cinza, verde, azul, rosa e até preta, densidade entre 2,7 e 2,8 g/cm³, dureza 1 na escala de Mohs e cristais de tamanhos de 100 µm até alguns centímetros. Acrescenta que os minérios oriundos de rochas básicas e ultrabásicas são mais impuros, com alto teor de ferro devido à variação de minerais acessórios como serpentina, tremolita, actinolita e antofilita.

Quanto a textura, Fabris (2006) afirma que o minério de talco possui três aspectos macroscópicos diferentes:

- i. pulverulento: fácil moagem e desagregação, semelhante ao caulim;
- ii. maciço ou compacto: aspecto de rochas maciças de usinagem, fácil moagem e ocorrência em diferentes cores;
- iii. lamelares: semelhante às micas, sob forma de placas de espessuras e dimensões variáveis, de fácil clivagem porém, de difícil moagem.

Monte *et al.*, (2003) considera que as propriedades físico-químicas do talco variam de acordo com a destinação do produto com explicitado na Tabela 1, ressaltando a importância de características como a granulometria, grau de pureza e cor do produto. A tabela abaixo mostra alguns parâmetros exigidos por diferentes indústrias em função da aplicação do minério de talco.

Tabela 1 - Especificações do talco para uso industrial. (Fonte: Modificado de Pontes & Almeida, 2005).

Usos	Granulometria(#)	Composição Química	Alvura (ISO)	Mineralogia	Propriedades	Outros
Tintas: espalhador	100%<200 96,5%<325	SiO ₂ +MgO≥75% Al ₂ O ₃ ≤2%;H ₂ O+M.Vol.≤1%; PPC≤7%	65-87	Partículas lamelares	Inércia química, hidrofobicidade e alvura	Peso específico: 2,8 a 2,9
Pigmentos	100%<325	MgO-24 a 32%; SiO ₂ -50 a 65%; CaO ≤ 9%; MgO+SiO ₂ ≥88%; CO ₂ ≤1%; PPC ≤7% Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ ≤6%; H ₂ O+M.Vol.≤1%	77 – 87	Partículas fibrosas (tremolítico)	Alvura, inércia química, absorção de óleos 27 a 31%	Peso específico: 2,8 a 2,9
Inseticida	90%<325	pH – 8	-	-	Inércia química	Adsorção
Têxteis	Sem resíduos arenosos	-	-	Sem minerais de alta dureza	Alvura	-
Papel (carga)	95%<400	-	54 a 75	-	Inércia química, alvura	-
Plástico: carga e reforço	100%<200	-	≥74	Talco ou pirofilita	Inércia química e alvura	-
Anti-aderente	100%<325	-	≥74	Talco ou pirofilita	Inércia química e alvura	Acidez baixa

Quanto à presença do minério de talco na fabricação de tintas, este é utilizado como carga e pigmento em usos externos de superfícies expostas à abrasão e tintas de baixa visibilidade. Já na produção de borrachas para válvulas, o talco é utilizado como pulverizador com o objetivo de lubrificar moldes e evitar que as superfícies se liguem durante a manufatura do produto. Na indústria têxtil, após atingir granulometria muito fina, o talco dá peso e alveja tecidos de algodão, barbantes e fios (Fabris, 2006), sendo esta mesma função alvejante exercida na indústria de papel, além de atuar como carga quando incorporado à massa e de evitar reações com outros materiais usados na fabricação de papel (Campos, 2011).

2.2. Localização do depósito de talco

O depósito foco deste estudo situa-se na metade sul do estado do Rio Grande do Sul, a 225 km da cidade de Porto Alegre e a 9,3 km do município de Caçapava do Sul. Partindo deste município e utilizando a BR-392 em direção a São Sepé, à esquerda, após 8,1 km uma estrada secundária dá acesso à área licenciada para exploração (Figura 2). Esta área contém além do depósito mineral, um espaço para deposição do material para posterior britagem primária, uma pilha de estéril e um escritório. Atualmente, todas estas instalações estão fora de operação.

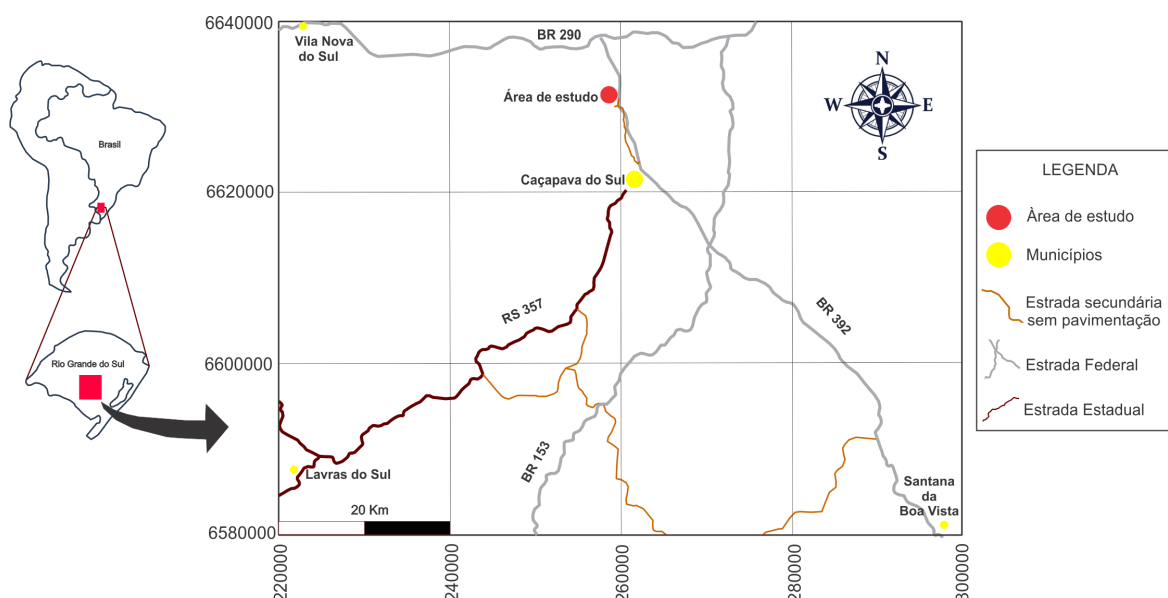


Figura 2 - Mapa de localização com área de estudo em destaque.

2.3. Caracterização geológica do depósito

Goñi *et al.*, (1962), descreveu os mármores que ocorrem no Complexo Metamórfico Passo Feio, denominando como Formação Vacacaí. Esta formação estaria constituída por mármores, filitos, quartzitos, anfíbolito xisto, clorita xisto com níveis de granada, escapolita grafita e evidências de feldspatização. Ribeiro *et al.*, (1966) e Ribeiro (1970) denominam a Formação Vacacaí como Cinturão Metamórfico Passo Feio. Posteriormente, de acordo com Bitencourt (1983), o Complexo Metamórfico Passo Feio está inserido no Domínio São Gabriel e bordejando o Granito Caçapava do Sul apresentando sequência de metapelitos e mármore (metassedimentares), anfíbolitos, rochas metavulcanoclásticas, quartzitos xistos magnesianos e quartzos feldspáticos metamorfizados. Neste complexo, encontra-se o depósito de talco foco deste estudo (Figura 3).

O Complexo Metamórfico Passo Feio é formado por sequências de xisto, quartzito, filito e mármore. Esta unidade geológica insere-se no Terreno São Gabriel, de idade neoproterozóica, constituindo o cinturão Dom Feliciano, no extremo sul da província Mantiqueira. Os mármores que detêm valor econômico apresentam composição dolomítica e encontram-se intercalados com corpos de rochas silicosas, metassedimentos pelíticos, intrusões de apófises de granito, diques e soleiras de diabásio. Mesmo sendo cortados por corpos estéreis, a extração de calcário ainda se torna viável (Lopes, 2012).

O minério de talco deste depósito, ocorre através de processos de alteração hidrotermal de minerais magnesianos, principalmente olivina e ortopiroxênios, mas pode também ocorrer a partir do processo de metamorfismo regional ou de contato sobre calcários magnesianos ou rochas ultrabásicas. Esta ocorrência está associada à minerais de biotita, clorita, serpentina e carbonatos (Machado, 2016).

Quanto a geologia local, pôde ser observado que o mineral talco encontra-se depositado ora intercalado e ora sobre o anfíbolito, evidenciado pelo afloramento no lado oeste da bancada. O anfíbolito neste depósito é uma rocha metamórfica de origem ígnea básica (Winge, 2016), relativamente dura com presença de quartzo que acompanha a xistosidade do depósito.

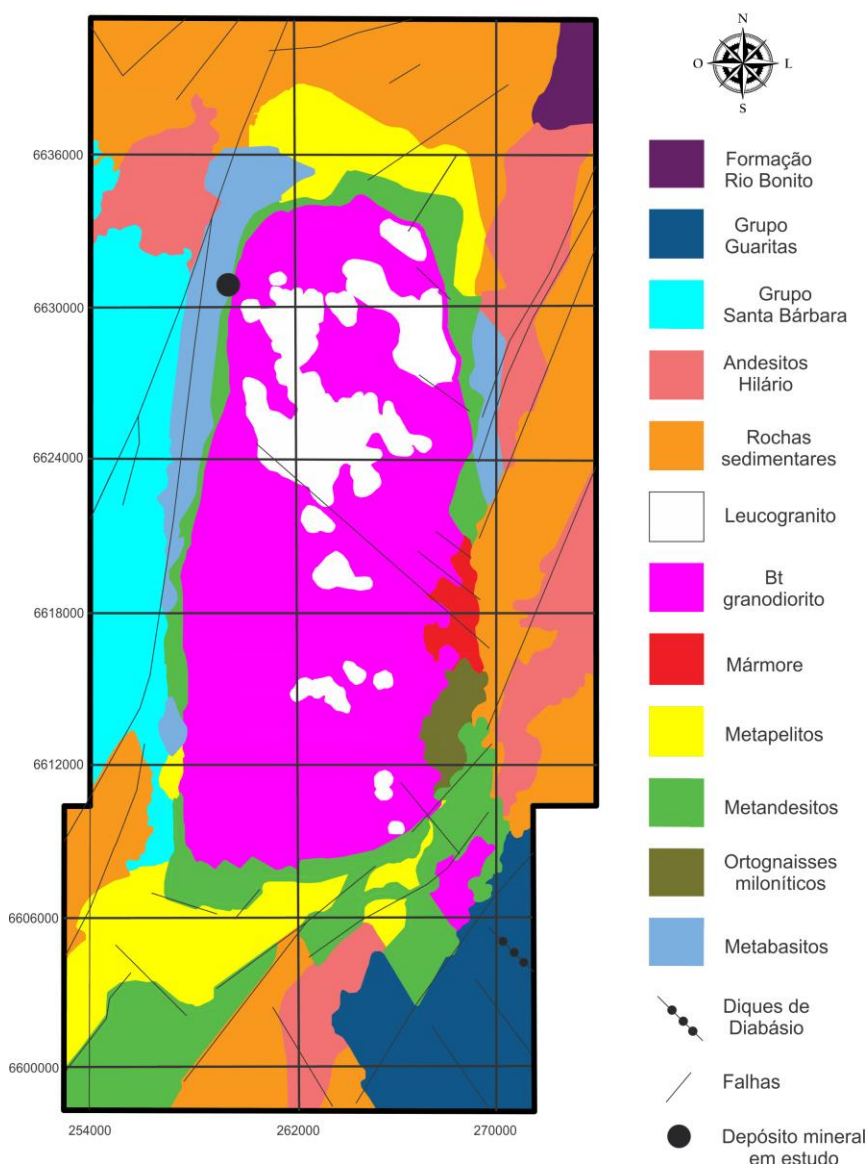


Figura 3 - Mapa geológico Complexo Passo Feio - Caçapava do Sul (Modificado UFRGS, 1998).

À oeste da bancada amostrada, percebe-se neste anfibolito além de fraturas preenchidas por talco (Figura 4a e 4b), veios de quartzo de ~ 0,5 cm (Figura 4c), e à leste, presença predominantemente de minério de talco com graus de intemperismo variando de médio a alto. Em zonas de médio intemperismo, presencia-se minerais de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), ortopiroxênios de fórmula química $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ (Figura 4e) e óxidos de ferro (Fe_2O_3) com teor inferior ao encontrado em zona de grande intemperização. Nesta, ocorre a presença de altos teores de óxido de ferro (Figura 4d), dando coloração avermelhada ao depósito assim como observou Walker (1967) ao afirmar que o recobrimento da grande maioria dos grãos destas rochas por películas de óxido de ferro origina a cor avermelhada presente em regiões do depósito. Ressalta-se que todas estas identificações foram possíveis através de análise de espectrometria de Fluorescência de Raios-X em amostras retiradas do depósito.

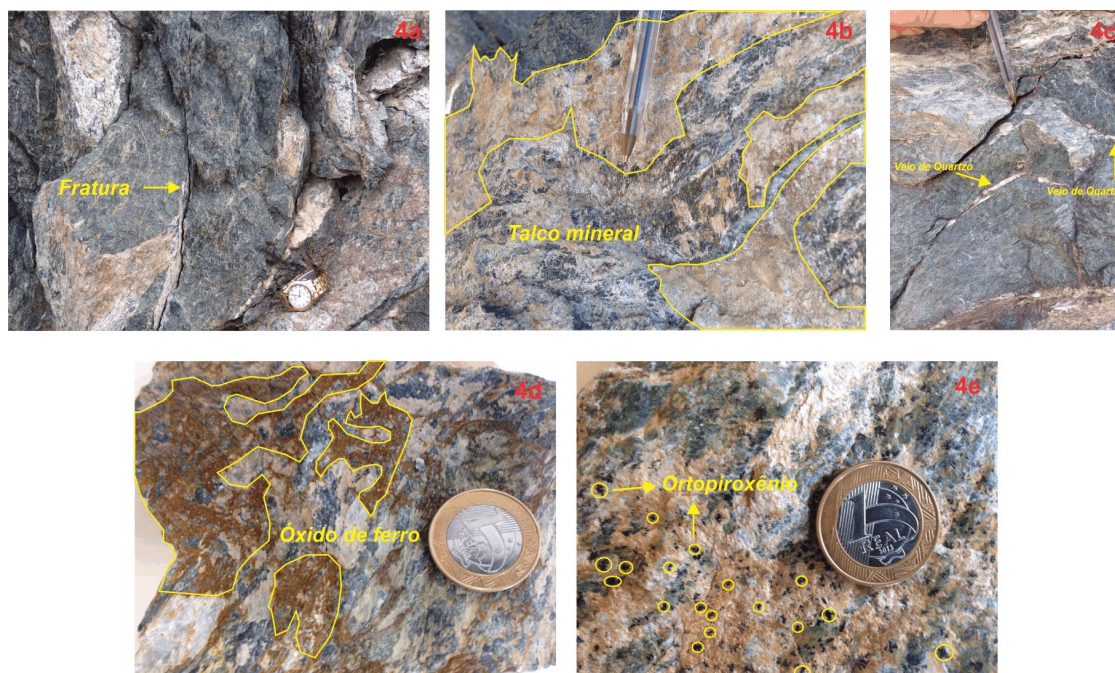


Figura 4 – (a) Fratura; (b) mineral talco presente no preenchimento das fraturas; (c) veios de quartzo observados no anfibólito; (d) óxido de ferro (Fe_2O_3) e (e) ortopiroxênios ($(Mg,Fe)_2Si_2O_6$) identificados por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X em amostras coletadas no depósito.

2.4. Caracterização tecnológica

Fontes (2013) define a caracterização tecnológica de um minério de ferro especularítico reunindo informações como densidade, propriedades magnéticas, entre outros, ao permitir conhecer química e fisicamente as propriedades de um determinado minério. Tal caracterização objetiva estipular uma rota de processo de beneficiamento baseada no minério e nas necessidades de mercado, buscando maior eficiência quanto às possíveis alterações de pequenas propriedades durante o processo.

O sucesso da separação de minerais de interesse por operações de concentração depende de 3 condições básicas (Fundação Cristiano Ottoni, 2016):

- i. liberação: onde há individualização das espécies de forma a torná-las livres;
- ii. diferenciabilidade: existência de uma propriedade (natural ou induzida) capaz de diferenciar as espécies minerais entre si (Tabela 2) e,
- iii. separabilidade dinâmica: presente quando um jogo de força composto atua na zona de separação do equipamento promovendo trajetórias diferentes às partículas, evidenciando uma resposta quanto à diferenciabilidade do material.

Tabela 2 - Métodos de tratamento de minério em função da diferenciabilidade dos minerais.

Propriedades	Métodos
Densidade	Líquido ou meio denso
Textura e friabilidade	Cominuição, classificação ou peneiramento
Susceptibilidade Magnética	Separação magnética
Reatividade de superfície	Flotação

De acordo com Neumann *et al.*, (2010), a caracterização tecnológica de um minério varia de acordo com a mineralogia e propriedades inerentes ao mesmo, assim como a abrangência e os objetivos da caracterização. Sendo assim, a caracterização possui quatro estágios principais, independentes entre si, definidos a seguir:

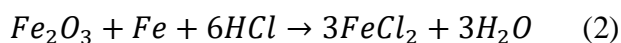
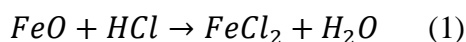
- i. fracionamento da amostra: facilita a identificação de minerais, a quantificação de fases, estabelece algumas propriedades físicas;
- ii. identificação de fases: por exemplo, sinal claro e de fácil interpretação de minerais concentrados no fracionamento;
- iii. quantificação dos minerais;
- iv. liberação do mineral de interesse: relacionado aos minerais da ganga, é verificada em diversas faixas de tamanho de partículas.

2.5. Estudos de lixiviação/purificação com ácido clorídrico (HCl)

A dissolução do mineral-metal pela água ou por uma solução aquosa do agente lixiviante é denominado lixiviação. Considera-se a característica básica da lixiviação a capacidade de tratar minérios com baixos teores, fundamentando-se na especificidade do agente de lixiviação empregado, além de permanecer em estado sólido o mineral do metal de valor. Quando este processo ocorre com o objetivo de remover impurezas, é chamado de lixiviação inversa (Heck, 2016).

Fabris (2006), ao processar minério de talco visando a redução da concentração de ferro, utilizou ácido clorídrico (HCl) a 4 molar, massa inicial de 5 gramas, durante 30 minutos e a uma temperatura de 80°C, obteve resultados positivos para extração de ferro na ordem de 78,7 %. Neste mesmo estudo, ao exceder o tempo (30 minutos) de exposição da amostra ao ácido, manteve-se a alvura do produto. Além disso, foi observado que a temperatura e o tempo são fatores determinantes no processo de dissociação do ferro, provando eficácia dos testes ao submeter amostras até 80 °C e a 30 minutos, respectivamente.

Também, visando a redução do teor de ferro em amostras, Rodrigues (2010) realizou ataques químicos em um concentrado de flotação de resíduos de oficinas de artesanato de pedra sabão utilizando HCl, partindo do flotado com alvura de 70,8 % e obtendo-se um produto final com alvura máxima de 86,5 % através das seguintes reações:



Neste mesmo trabalho, Rodrigues (2010) ao realizar lixiviação ácida em uma amostra bruta dos finos (<74 µm) da pedra sabão, com alvura inicial de 51,8%, obteve alvura de 77,4% no produto. Para obtenção destes resultados, foram utilizadas solução de HCl com a concentração de 4 molar, temperatura em torno de 80 °C, por um tempo de 60 minutos. As maiores alvuras ocorreram no maior tempo de reação (60 minutos), com temperaturas acima de 75 °C e concentrações de HCl superiores a 3,5 molar.

2.6. Estudos de Separação magnética

Método importante de processamento para concentração e purificação de minérios, a separação magnética ocorre devido a diferentes respostas associadas individualmente às espécies mineralógicas ao campo magnético. Este campo magnético é determinado a partir da resposta de uma propriedade denominada susceptibilidade magnética (Silva, 2012).

Rodrigues (2010) realizou estudos de separação magnética com amostras de finos de pedra sabão, utilizando polpas com 20 % de sólidos e granulometrias maior e menor que 74 μ m, no qual foram avaliados os campos magnéticos (3000, 4300 e 4900 Gauss) e correntes empregadas (3, 5 e 7 ampéres).

Os melhores resultados obtidos foram na fração granulométrica menor que 74 μ m, pois com a fração maior do que 74 μ m, houveram inclusões de partículas de ferro oxidado nos grãos de talco devido à atração gerada pelo campo magnético. A aplicação de 4900 Gauss promoveu um aumento de 6 % na alvura.

Fontes (2013) aplicou campos magnéticos de baixa e alta densidade a um minério de ferro especularítico de granulometrias entre 0,21 e 0,30 mm, com objetivo de atrair as partículas, concentrando-as. Esta concentração gerou material ferromagnético como produto concentrado na ordem de 67,0 %, de acordo com a distribuição das frações em massa após a separação magnética.

Ainda, neste trabalho, Fontes (2013) afirma que baixos campos magnéticos são aplicados para materiais com alta susceptibilidade magnética, enquanto altos campos magnéticos devem ser aplicados para materiais paramagnéticos (Tabela 3) e julga importante o controle da taxa de alimentação, ou seja, a velocidade e o fluxo com que as partículas passam pelo campo magnético, preferindo a utilização de baixa velocidade do fluxo para evitar que partículas magnéticas sejam arrastadas com as partículas não-magnéticas.

Tabela 3 - Relação entre minerais e a aplicação de um campo magnético (Modificado Luz & Sampaio, 2004)

Grupos	Minerais	Campo magnético em tesla (T)	Minerais
Grupo 1	Ferromagnéticos	Faixa de campo de 0,05 a 0,5	Ferro e Magnetita
Grupo 2	Magnéticos	Faixa de campo de 0,5 a 1,0	Ilmenita e Pirrotita
Grupo 3	Fracamente Magnéticos	Faixa de campo de 1,0 a 1,8	Hematita, Talco e Dolomita
Grupo 4	Muito Fracamente Magnéticos	Faixa de campo acima de 1,8	Serpentinita, Dolomita e Feldspato
Grupo 5	Não Magnéticos e Diamagnéticos	-	Calcita e Fluorita

Observação: 1T (Tesla) = 10000 Gauss.

3. Materiais e métodos

3.1. Amostragem de canal

Segundo Haldar (2012), a amostragem de canal é realizada em uma superfície recentemente exposta, através de um corte linear horizontal que atravessa o corpo mineralizado. Ressalta-se que a área amostrada deve ser limpa para remoção de poeira, limos, entre outros e que o comprimento da amostra depende da variação das mineralizações através do corpo de minério. Quanto às medidas, Haldar sugere a largura entre 5-10 cm e uma profundidade entre 1-2 mm.

Com objetivo de determinar um parâmetro dentro de uma população, buscando o equilíbrio entre o menor número de amostras e o maior grau de precisão possível, Arioli & Andriotti (2007) afirmam que a amostragem de canal pode ocorrer em corpos com espessura entre 1-5 metros, de composição heterogênea a irregular para aplicação de teses químicos e geoquímicos em rochas friáveis e alteradas. Sugerem que as dimensões do canal de amostragem sejam: largura entre 5-10 cm e a profundidade entre 3-5 cm.

No depósito de talco, a amostragem foi realizada através de um canal ao longo dos 47 m da face da bancada, obedecendo a altura média entre a base e o topo da mesma, e apresentando as seguintes dimensões: largura de 10 cm e 4 cm de profundidade previamente demarcadas (Figura 5a), totalizando 440 kg de material amostrado. Esta etapa foi precedida pela limpeza da face da bancada (Figura 5b) para remoção da alteração química (oxidação) superficial da rocha.

O canal (Figura 5c) foi amostrado utilizando martelo geológico, ponteira, talhadeira e marreta, e todo material coletado metro a metro foi recolhido diretamente em uma bandeja retangular de plástico, posicionada logo abaixo do nível inferior do canal amostrado e armazenado em sacos plásticos limpos e identificados.

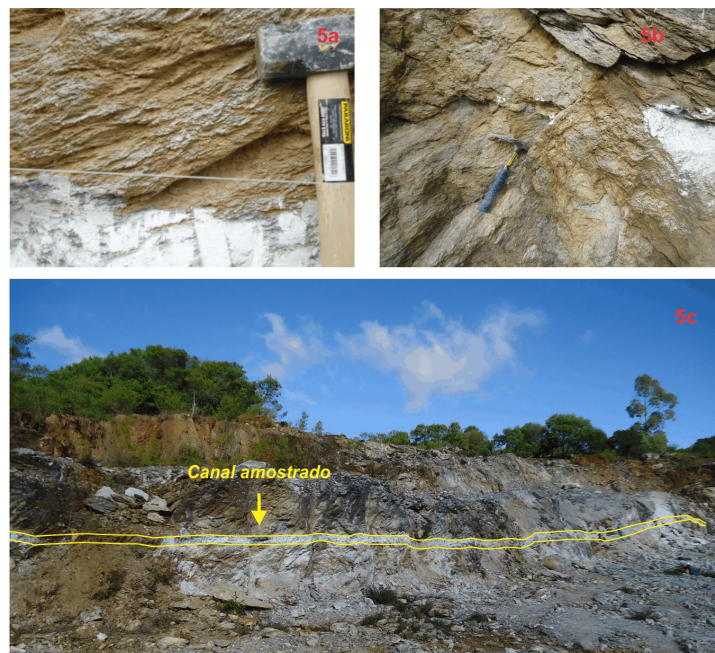


Figura 5 – (a) Demarcação das dimensões do canal de amostragem, (b) limpeza da face da bancada e (c) canal de amostragem após retirada do material.

3.2. Caracterização tecnológica

3.2.1 Preparo da amostra

O preparo da amostra foi realizado conforme os fluxogramas (Figuras 6 (a) e (b)) apresentados abaixo onde todo material amostrado foi britado (britagem primária) utilizando um britador de mandíbulas (marca Lombard, modelo 3) (Figura 7(a)), ambientado previamente com 5 kg de material amostrado. Após a britagem primária, o material foi disposto em um pilha longitudinal montada sob lona, para homogeneização e quarteamento (Góes et al., 2004), e armazenamento em recipientes plásticos fechados para preservar as características da amostra. Uma alíquota de ~ 100 kg foi submetida a britagem secundária em britador de rolos (marca Denver) que em seguida foi peneirada a seco em malha de 3,35 mm. O material retido na malha retornou ao britador de rolos para obtenção de um produto 100 % <3,35 mm para alimentação da etapa de moagem. Então, todo o material foi novamente homogeneizado e quarteado pelo método de pilha longitudinal (Figura 7(b)) e as alíquotas obtidas (~6 kg) foram armazenadas em sacos plásticos.

Os testes de moagem foram realizados em moinho de bolas e jarros de cerâmica (marca Servitech, modelo CT/240) com volume de ~3 L, com alíquotas de 336,7 g de amostra, distribuição de tamanho de corpos moedores conforme apresentado na Tabela 4, e tempos de moagem de 15, 20 e 23 minutos com o objetivo de reduzir o minério do tamanho inicial até o F80 (80 % passante) em 74 µm. O material moído foi peneirado para verificar a granulometria obtida para cada tempo de moagem avaliado.

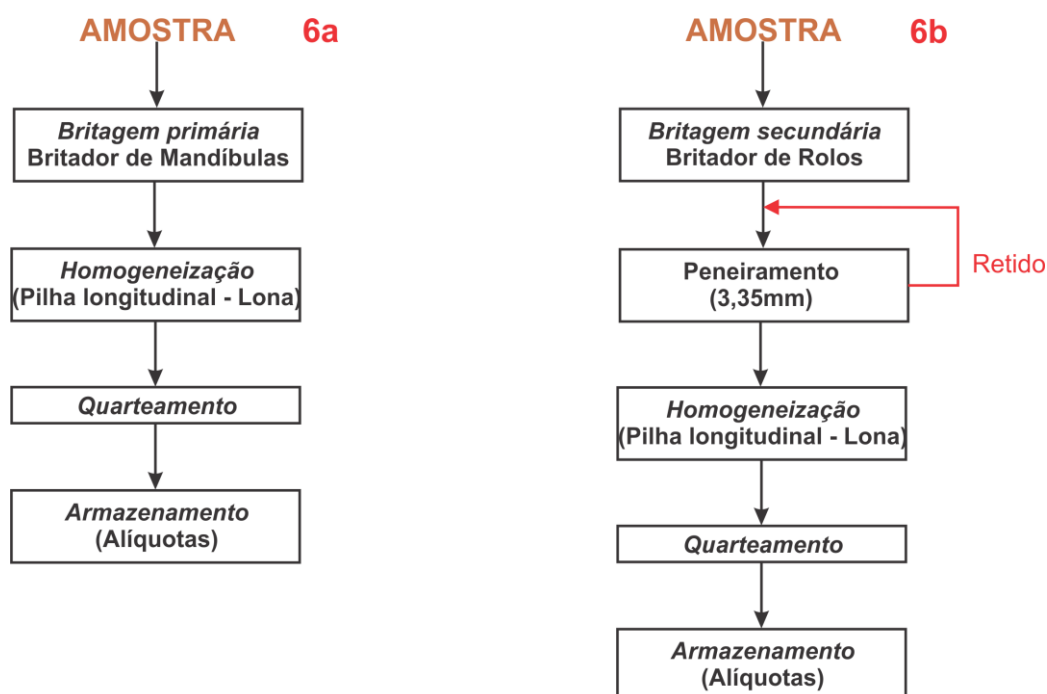


Figura 6 – (a) Fluxograma de preparo de amostra com britagem primária, e (b) britagem secundária.



Figura 7- (a) Vista superior do britador de mandíbulas Lombard, (b) homogeneização da pilha do minério.

Tabela 4 - Carga moedora utilizando um moinho com capacidade de 3 L.

Nº de bolas	Diâmetro (mm)
30	36,5
46	30,2
7	25,4
49	19,1
66	15,9

3.2.2 Análises granulométricas

A distribuição granulométrica foi realizada por peneiramento a úmido, com alíquotas de ~100 g de material proveniente da moagem e peneiras de laboratório de 20 cm de diâmetro com as seguintes malhas: 100 # (149 μ m), 150 # (105 μ m), 200 # (74 μ m), 325 # (44 μ m) e 400 # (37 μ m).

As frações retidas nas peneiras foram filtradas em filtro à vácuo, secas em estufa a temperatura de 50 °C por 24 h, e pesadas para determinação da distribuição granulométrica.

3.2.3 Densidade

A determinação da densidade do minério de talco foi realizada em duplicata pelo método de picnometria (CETEM, 2007). Para tanto, foi utilizada uma balança analítica de precisão com 4 casas decimais (modelo Bioscale, modelo FA 2204), picnômetros, água destilada/deionizada e ~ 1 g da amostra de minério de talco moído para cada um dos testes, onde foi:

- i. pesado o picnômetro de 50 ml vazio, seco e limpo;

- ii. depositada a amostra no picnômetro e pesado o conjunto amostra + picnômetro;
- iii. com a amostra ainda no picnômetro, adicionou-se água destilada/deionizada completando o volume do picnômetro para não sobrar espaços vazios/bolhas dentro do recipiente. Em seguida, foi pesado o conjunto (picnômetro + amostra + água);
- iv. retirada a polpa de dentro do picnômetro para lavagem do mesmo;
- v. adicionado apenas água destilada/deionizada ao recipiente, eliminando espaços vazios e eventuais bolhas;
- vi. pesado o conjunto picnômetro + água destilada.

Posterior às pesagens, o cálculo do valor da densidade relativa foi possível através da equação 3 abaixo.

$$d_s = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad (3)$$

Onde: d_s – densidade dos sólidos; A_1 – massa do picnômetro; A_2 – massa do picnômetro + amostra; A_3 – massa do picnômetro + amostra + água; A_4 – massa do picnômetro + água.

3.2.4 Umidade

A análise de umidade foi realizada em duplicata com alíquotas de 5 g de amostra de minério de talco moído, pesadas em cadinho em balança analítica (marca Bioscale, modelo FA 2204), e secos em estufa a temperatura de 105 °C por 5 h. Após este período, o conjunto foi levado ao dessecador para resfriamento e posterior pesagem. O procedimento foi repetido até atingir peso constante ou diferença de no mínimo 0,001 g.

A umidade foi expressa em base seca (Chaves, 2002) para estimativa do peso de água presente no minério (CETEM, 2007) e calculada conforme a equação 4.

$$\text{umidade (\%)} = 100 \frac{(\text{massa úmida}) - (\text{massa seca})}{\text{massa úmida}} \quad (4)$$

3.2.5 Análise mineralógica

A mineralogia do minério de talco foi obtida a partir da análise de DRX (Difratometria de Raios-X) de uma alíquota de 20 g de material oriundo da moagem, realizada pelo Departamento de Física/UFRGS e utilizando um difratômetro de raios-x da marca Siemens, modelo D-500 com monocromador curvado de grafite no feixe secundário e tubo de ânodo fixo de Cu, operando a 40 kV e 17,5 mA.

3.2.6 Análises química

As frações granulométricas e amostras pulverizadas foram analisadas para os seguintes elementos: Mg, Ca, Al e Fe pelo método de Espectrometria de Absorção Atômica com Chama no Instituto de Química/UFRGS. Ressalta-se que as matrizes das alíquotas foram decompostas com a utilização de 2mL HCl, 1mL HF concentrados e 2mL H₂O.

3.2.7 Análises de alvura

A análise da alvura foi realizada segundo a norma ISO 2470 (ABNT, 2001) que atribui peso para a reflectância na faixa de 400 a 510 nm (Gonçalves, 2009). Para tanto, as alíquotas foram pulverizadas em moinho de disco orbital (marca Astecma, modelo Vibro-Mill-1), prensadas para formação de pastilha e as reflectâncias obtidas utilizando um espectrofotômetro da marca Konica-Minolta, modelo CM2600d, calibrado previamente com branco padrão. As análises foram realizadas com amostra moída sem e com corte em 100#, com as faixas granulométricas de 100 #, 150 #, 200 #, 325 # e 400 #, e com os produtos da separação magnética e da lixiviação.

3.3 Estudos de separação magnética em tubo Davis

Os estudos de separação magnética foram realizados com um separador tipo Tubo Davis (marca Inbras, modelo EDT) mostrado na Figura 8(a). Nesse equipamento a variação da corrente elétrica é de 0 e 2 Ampéres e o campo magnético de 0 e 4050 Gauss.

Os testes de separação foram alimentados com dois tipos de amostras previamente moídas: uma amostra sem corte granulométrico (bruta) e a outra com corte do retido em 100 # (150 μm). Para essas amostras foram aplicados dois campos magnéticos de 3050 Gauss (1,4 A) e 4050 Gauss (2,0 A) e procedeu-se da seguinte maneira:

- i. posicionado o tubo de vidro em 45 ° relativo à horizontal e ligado o separador magnético 20 minutos antes do início do uso para que o campo e a corrente se estabilizassem;
- ii. sem desligar o campo magnético e após o tempo de estabilização do mesmo, o tubo foi alimentado transferindo toda a amostra com auxílio de pisseta com água. Em seguida, preencheu-se o tubo com água até a altura do anel de encaixe;
- iii. o tubo foi tampado e sua agitação ajustada a 50 rpm durante o tempo de 2 minutos;
- iv. cessado o tempo de ensaio, a agitação foi desligada e com o campo magnético ligado, coletou-se a polpa de material não magnético em balde limpo (Figura 8(b));
- v. após, desligou-se o campo magnético para coleta do material magnético em recipiente limpo utilizando pisseta com água;
- vi. os produtos magnéticos e não magnéticos foram secos em estufa a temperatura de 50 °C, por 24 h, pesados e o produto não magnético foi pulverizado em moinho de disco orbital, e sua alvura foi analisada.



Figura 8 – (a) Tubo Davis operando durante a separação e (b) coleta do material e lavagem do tubo após separação magnética.

3.4 Estudos de lixiviação/purificação com ácido clorídrico (HCl)

Os estudos de lixiviação foram realizados com alíquotas de 5 g de minério de talco, pesados em balança semi-analítica (marca Marte, modelo AS2000). A essas amostras foi adicionado ácido clorídrico (HCl) na concentração de 4 M. A polpa (15 % p/p sólidos) proveniente dessa mistura foi agitada com o emprego de um agitador magnético (marca Fisatom, modelo 752A) com controle de rotação e agitação (~1000 rpm). Os testes foram realizados a temperatura ambiente (~22 °C) e com emprego de aquecimento (~80±5 °C). Foram avaliados os tempos de contato de 10 a 60 minutos.

Ainda, foram realizados testes de lixiviação com o produto não magnético, proveniente do ensaio de separação magnética com amostra com corte granulométrico (-100 #) e campo 4050 Gauss (2,0 A), e com amostra com corte granulométrico (-100 #). Para tanto, foi utilizado aquecimento a 80±5 °C por 60 minutos.

4. Resultados e discussão

4.1. Caracterização do minério de talco

4.1.1. Amostra de minério de talco moída

A Tabela 5 resume os resultados de caracterização da amostra de minério de talco moída. A densidade relativa de 2,67 foi coerente com o valor de minerais silicatados (~2,7). Além disso, apresentou umidade natural menor do que 1 % e alvura de ~60 %. A amostra apresentou elevados conteúdos dos elementos analisados por absorção atômica (Mg, Al, Fe e Ca). Porém, devido a digestão ácida não ter sido completa, podem haver espécies químicas insolúveis que contêm esses elementos, e que não foram analisadas.

Tabela 5 – Resumo dos resultados de caracterização da amostra de minério de talco moída.

Densidade relativa	Umidade (%)	Alvura (%)	Fe (mg/g)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	Al (mg/g)
2,67	0,88	59,2	34,5±0,01	16,6±0,0	199,7±0,03	147,3±0,2

4.1.2. Análise mineralógica

Foram identificadas 5 fases cristalinas na análise mineralógica: antigorita (A), clinoclóro (C) e magnesita (M), constituintes dos minerais de minério, e dolomita (D) e esteatita (E), que compõem os minerais de ganga, confirmando a mineralogia da região descrita anteriormente. O pico da fase esteatita apresenta elevada intensidade, o que evidencia a excelente cristalização desta fase, porém, ocasionando a não observação de fases próximas ao *background* (linha de base), como por exemplo fases ferromagnéticas (Figura 9). Ainda, algumas fases se sobrepõem caracterizando baixa simetria, comum em amostras policristalinas.

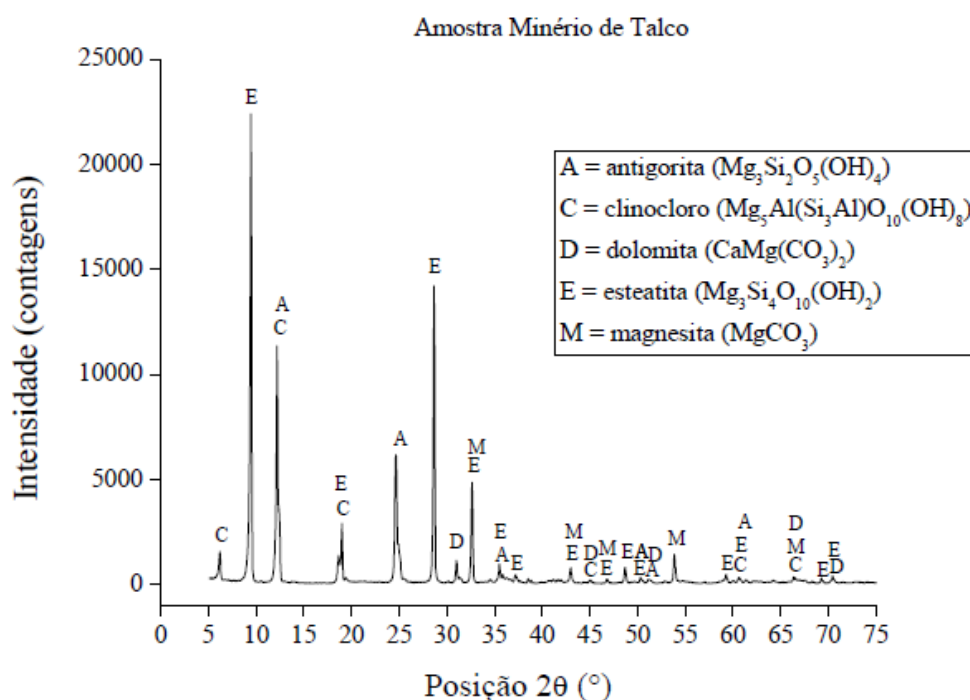


Figura 9 – Difratograma de Raios-X da amostra do minério de talco.

4.1.3. Análise granulométrica e granuloquímica

A distribuição do tamanho das partículas apresentou maior conteúdo na fração de - 37 µm onde as partículas possuem granulometria mais fina, e máximo de ~10 % nas demais frações (Figura 10(a)).

Os teores dos elementos Fe, Ca, Mg e Al em função das faixas granulométricas apresentaram comportamentos distintos e são mostrados na Figura 10 (b). O conteúdo de Fe (~50 mg/g) se distribui em todas as frações granulométricas da amostra. O teor máximo de

Ca (~50 mg/g) foi observado na fração de 74 μm e de Al na fração <37 μm . Já, o Mg apresentou maiores conteúdos nas frações mais finas (<44 μm) e nas frações >74 μm .

A alvura apresentou comportamento semelhante para todas as frações com valores maiores que 50 %, a exceção do retido em 37 μm (Figura 10 (c)).

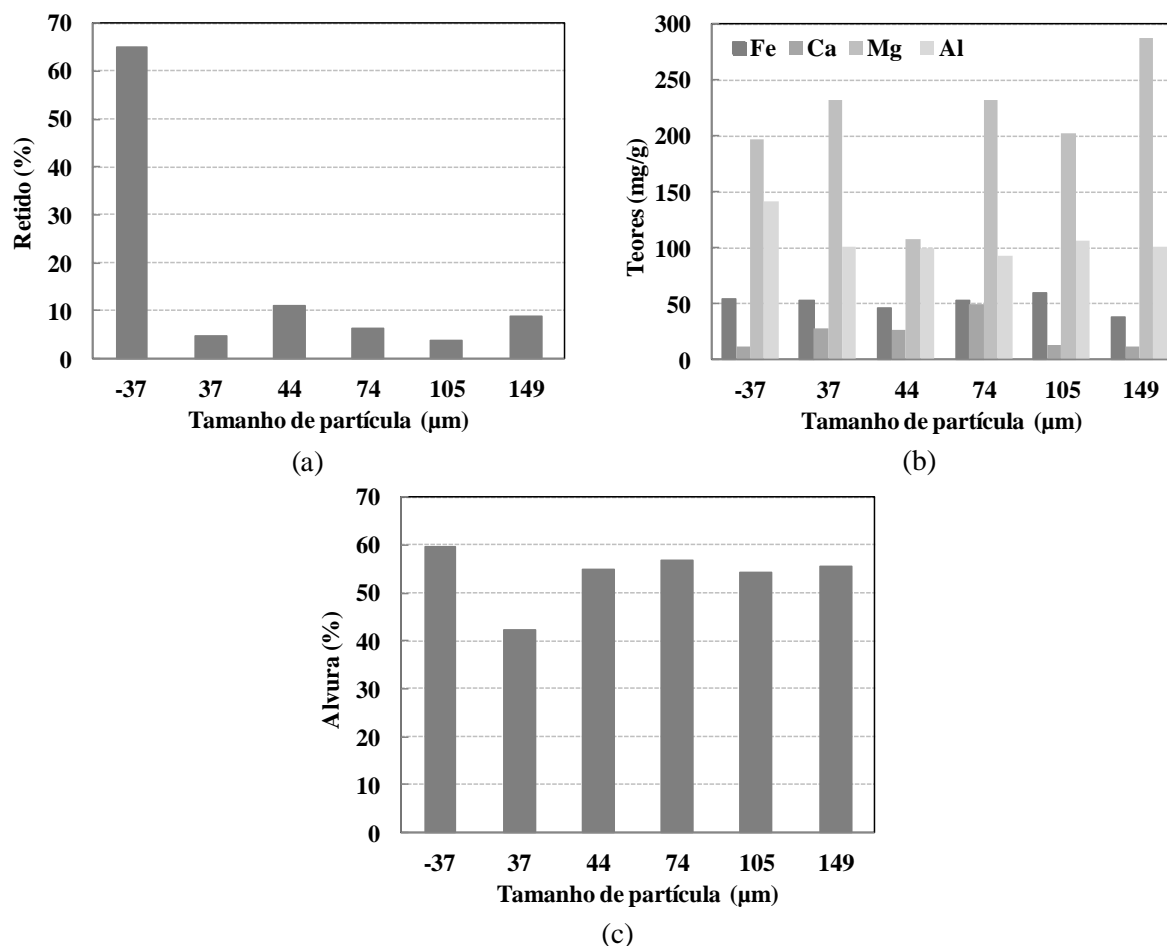


Figura 10 – (a) Distribuição granulométrica da amostra de minério de talco moído, (b) teores e (c) alvura de cada produto retido.

4.2. Estudos de separação magnética

Ao considerar a recuperação mássica global, no qual foram avaliadas as perdas do processo de corte granulométrico e separação magnética, os resultados obtidos com as amostras cortadas (85,1 % e 85,6 %) foi inferior às obtidas com as amostras sem corte (90,6 % e 93,9 %). A maior recuperação mássica global foi obtida após separação magnética, sem corte, da mesma amostra (Tabela 7).

O processo de separação magnética proporcionou o acréscimo de alvura na ordem de 5,7 % na amostra sem corte quando esta é submetida a um campo de 4050 Gauss e observou-se que após a separação, a análise de alvura final apresentou resultados muito próximos (~64 %).

Tabela 6 – Resumo de resultados dos ensaios de separação magnética.

Alimentação	Corrente(A)/ Campo(Gauss)	Recuperação Mássica (%)	Desvio padrão	Rec. Global (%)	Alvura Inicial	Alvura Final
Com corte (100 #)	1,4/3050	93,5	0,03	85,1	61,0	64,1
Com corte (100 #)	2,0/4050	94,1	0,81	85,6	61,0	62,6
Alimentação	Corrente(A)/ Campo(Gauss)	Recuperação Mássica (%)	Desvio padrão	Rec. Global (%)	Alvura Inicial	Alvura Final
Sem corte	1,4/3050	93,9	0,19	93,9	59,2	64,3
Sem corte	2,0/4050	90,6	0,26	90,6	59,2	64,9

4.3. Estudos de lixiviação

A Figura 11 (a) apresenta a recuperação mássica dos produtos dos ensaios de lixiviação a ~ 22 °C (temperatura ambiente) e a $\sim 80 \pm 5$ °C. Ao realizar os estudos a temperatura de 80 ± 5 °C, a recuperação diminui ~ 10 % no intervalo de tempo de 10 e 60 minutos, estabilizando a partir de 30 min. Entretanto, à temperatura ambiente esta diferença é de apenas ~ 2 %, sendo praticamente constante ao longo do tempo. Sabe-se que o emprego de temperatura aumenta a taxa de lixiviação. No entanto, a diferença de alvura obtida entre os produtos das distintas temperatura é de cerca de 4 % (Figura 11 (b)).

A máxima alvura (72,3 %) após o ensaio de lixiviação foi obtida com a amostra da separação magnética com corte em 100 #, que também apresentou o maior delta (10,3 %) em relação a alvura inicial (Tabela 6). Porém, esse também apresentou a menor recuperação mássica global.

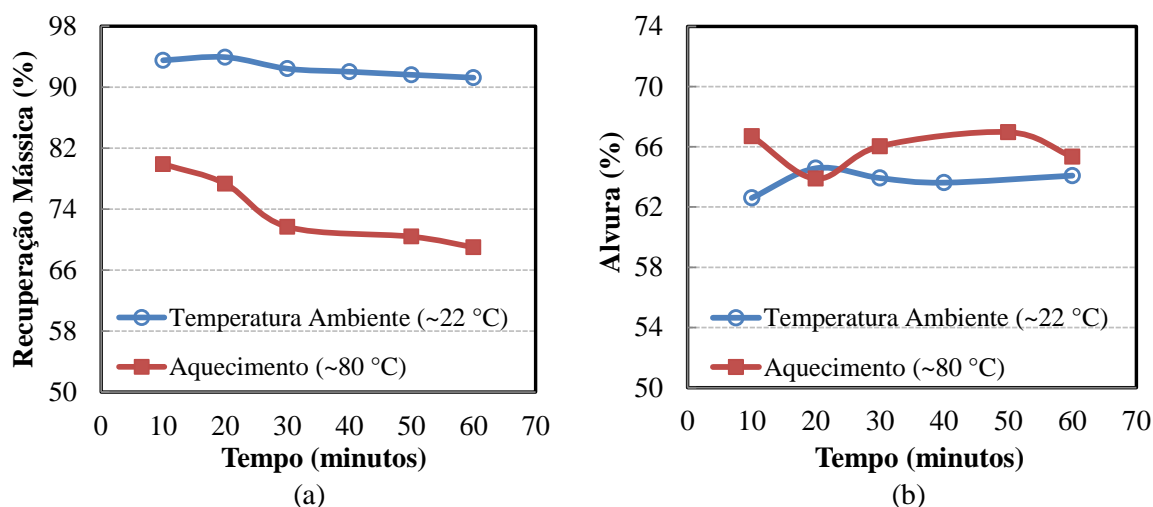


Figura 11 – (a) Recuperação mássica e (b) alvura dos produtos da lixiviação com amostra de minério de talco moído.

Tabela 7 – Resumo dos resultados de lixiviação ácida para as diferentes amostras alimentadas aos testes.

Alimentação	Recuperação Mássica (%)	Desvio padrão	Rec. Global (%)	Alvura Inicial	Alvura Final
Bruta	69	0,1	69	59,2	65,3
-100 #	68	1,4	61,9	61,0	64,5
Sep. Magnética (-100 #)	69	0,1	59,1	62,6	72,3

5. Conclusões

Após preparo da amostra, foi possível obter um material fino (~ 65 %) abaixo de 37 µm. Esta granulometria não está apropriada a nenhuma aplicação citada neste trabalho, porém após etapas de concentração poderá ser adequada às exigências do mercado (papel, tintas, etc.). A distribuição dos teores dos elementos analisados Fe, Ca, Mg e Al apresentaram comportamento distintos.

A densidade relativa do minério de talco é característica de um minério silicatado, podendo ser enquadrada nos critérios de aplicação. A alvura mostrou semelhança entre os valores obtidos podendo o minério de talco ser aplicado como carga na indústria de papel. Porém, ele apresenta grande conteúdo de elementos muito reativos (Fe, Ca e Mg), prejudicando sua aplicação. Ainda, de acordo com os dados de alvura obtidos por faixa granulométrica, o corte do material retido em 100# não influencia na alvura final da alimentação.

Quanto à caracterização mineralógica, foi possível identificar as 5 principais fases presentes no minério de talco (antigorita, clinocloro, magnesita, dolomita e esteatita), incluindo minerais de minério e de ganga.

O campo (3050 – 4050 Gauss) aplicado nos estudos de separação magnética proporcionaram a separação apenas para minerais como por exemplo ferro e magnetita. Em todos ensaios de separação magnética, a alvura final do produto não magnético foi de ~64 %. Este produto poderia ser aplicado à indústria de papel sendo necessário uma maior caracterização química dos elementos constituintes.

Nos estudos de lixiviação, com o emprego de aquecimento, houve o maior decréscimo na recuperação mássica a qual estabilizou a partir de 30 minutos de ensaio, porém a alvura apresentou valores muito próximos aos produtos resultantes dos ensaios a temperatura ambiente. Ao elevar a temperatura, se obtém maior velocidade na reação de lixiviação, diminuindo o tempo de contato entre o minério e o agente lixiviante. Esses fatores devem ser ponderados para um futuro dimensionamento dos equipamentos e da necessidade de aplicação de aquecimento em uma planta industrial.

O melhor resultado do estudo foi obtido utilizando a amostra com corte granulométrico (100 #) que foi submetida a separação magnética (4050 Gauss) e posterior lixiviação a 80 °C durante o tempo de 60 minutos. Para esse ensaio, foi obtido uma alvura máxima de 72,3 %, com um delta de 10,3 % em relação a alvura inicial. Este produto poderia ser aplicado, por exemplo, à indústria de tintas, inseticida, têxtil e papel, sendo necessária caracterização complementar para enquadramento às demais especificações.

Mesmo obtendo-se o melhor resultado nas condições de 80°C e 60 minutos no processo de lixiviação, deve-se ponderar os custos de implantação, operação e manutenção da aplicação de temperatura nesse processo. Finalmente, são sugeridos estudos futuros de flotação para verificar a aplicabilidade do processo.

6. Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Meise P. Paiva pela orientação e paciência na realização deste trabalho, à equipe técnica dos laboratórios LTM e LAPROM/UFRGS. À Mineração Butiaense, aos colegas Renato, João Tobias pela colaboração na etapa de amostragem, aos professores Delia Pilar, Ítalo, Luis Eduardo e Raul pelo apoio. À tia Maria Helena por me acolher em Porto Alegre. E agradecimento especial à minha Mãe e Irmã pelo amor, apoio e compreensão.

7. Referências bibliográficas

ALMEIDA, S. L. M., LUZ, A. B., PONTES, I. F. **Talco do Paraná – Flotação em usina piloto. Caracterização Tecnológica de Minérios - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM)**. pp.3-16 (1991)

AMARAL, R. Q. Talco e Pirofilita. **Sumário Mineral – Departamento Nacional de Produção Mineral**. 35, pp. 104-105 (2015).

ARIOLI, E. E., ANDRIOTTI, J. L. Silva. **Representatividade da amostragem na prospecção geoquímica - CPRM**. Disponível em : <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/487>>. Acesso em: 20/06/2016.

BITENCOURT, M. F. Geologia, petrologia e estrutura dos metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS. **Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS**. pp. 161 (1983).

CAMARA, A. L. Uso de talco nacional como aditivo adsorvente de piches e materiais pegajosos no processo de fabricação do papel. **Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG**. pp. 48-51 (2003).

CAMPOS, L. E. G. Balanço Mineral Brasileiro. **Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM**. pp.10 (2001)

FABRIS, I. L. Processamento químico do minério Talco-Silicato de Magnésio visando redução dos compostos de ferro. **Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC**. pp. 35-38; 58-85 (2006).

FONTES, A. V. Caracterização tecnológica de minério de ferro especularítico. **Trabalho de conclusão do curso de Geologia. UFRJ**. pp. 7-43 (2013).

FUNDAÇÃO CRISTIANO OTTONI. **Apostila do curso de Beneficiamento de Minério**. Disponível em: <<http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/1922320/LOM3071/P1.6.CaracterizacaodeMinerios.pdf>>. Acesso em 17/06/2016.

GÓES, M. A. C de., LUZ, A. B da., POSSA, M. V. **Amostragem. Tratamento de Minérios - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM)**. 4, pp.44 (2004)

GONÇALVES, Í. G. Determinação da concentração de contaminantes no caolim através da teoria de Kubelka – Munk. **Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, UFRGS**. pp. 5 (2009).

GOÑI, J.C., GOSO, H., ISSLER, R. S. **Estratigrafia e Geologia Econômica do Pré-Cambriano e Eopaleozóico Uruguaio e Sul-Riograndense**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 3, (1962).

HALDAR, S. K. Sampling Methods. **Mineral Exploration – Principles and Applications**. 7, pp. 128-129 (2012).

HECK, N. C. **UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06631/Lixiviacao.pdf>>. Acesso em: 18/06/2016.

LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A., ALMEIDA, S.L.M. **Tratamento de Minérios - CETEM**.4, pp. 858 (2004).

LOPES, C.G. Proveniência das rochas metassedimentares detríticas do complexo Passo Feio – Terreno São Gabriel, Caçapava do Sul – RS. **Trabalho de conclusão do curso de Geologia. UFRGS**. pp. 22 (2012)

MACHADO, F. B. UNESP - **Universidade Estadual Paulista**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/filossilicatos/talco.html>>. Acesso em: 17/07/2016.

MONTE, M.B.L., TRIGUEIRO, F.E., PAIVA, P.R.P. **Técnicas e alternativas para a modificação do caulim - Rochas e Minerais Industriais**. pp. 32, (2003).

NEUMANN, R., SCHENEIDER, C. L., NETO, A. A., **Caracterização Tecnológica de Minérios - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM)**. 4, pp.55 (2004)

NEUMANN, R., SCHENEIDER, C. L., NETO, A. A., **Caracterização Tecnológica de Minérios - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM)**. 5, pp.85-87 (2010)

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro**. 35, pp.798 (2010).

PONTES, I. F., ALMEIDA, S.L.M. Talco. **Rochas & Minerais Industriais – Usos e especificações – CETEM**, pp. 607-628 (2005).

RIBEIRO, M., BOCCHI, P.R., FIGUEIREDO FILHO, P.M., TESSARI, R.I. **Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul**. 127, pp.232 (1966).

RIBEIRO, M. **Geologia da folha de Bom Jardim: Rio Grande do Sul- Brasil**. In: Boletim: Divisão de Geologia e Mineralogia. 247, pp.1-142 (1970).

RODRIGUES, M.L.M., LIMA, R.M.F. Purificação de resíduos de oficina de artesanato em pedra-sabão por flotação e alveamento químico. **REM: Revista Escola de Minas**, 64 (3), pp.353-357 (2011).

SAMPAIO, J. A., SILVA, F. A. N. G da., **Determinação das densidades de sólidos e de polpa. Tratamento de minérios – Práticas Laboratoriais - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM)**. pp.40-45 (2007).

SILVA, A. C. **Universidade Federal de Goiás (UFG)**. Concentração física de minerais. (2012) Disponível em: <https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/cfm_05.pdf>. Acesso em: 20/06/2016.

SILVA, R. F. Operações Unitárias I. (2009) Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAtPkAD/flotacao-pdf>>. Acesso em: 20/06/2016.

UFRGS - **Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Projeto Caçapava do Sul: Mapeamento Geológico 1:25.000**. (1998).

WALKER, T. R. 1967. Formation of red beds in modern and ancient deserts. **Geological Society of America Bulletin**. 78, pp. 353-368 (1967).

WINGE, M. CPRM - **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais**. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/anfibolito.htm>>. Acesso em: 15/07/2016.